



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 195 39 174 C 1

⑤1 Int. Cl.⁶:
H01 B 1/02
B 60 M 1/13
C 22 B 9/00

⑳ Aktenzeichen: 195 39 174.8-34
㉔ Anmeldetag: 20. 10. 95
㉕ Offenlegungstag: —
㉖ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 27. 2. 97

DE 195 39 174 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉗ Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

㉘ Erfinder:
Kuhrt, Christian, Dipl.-Phys. Dr., 91334 Hemhofen,
DE; Fink, Arno, 91058 Erlangen, DE

㉙ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 36 34 495 C2
US 47 55 235
EP 05 69 036 A1
JP 59-0 89 743 A
JP 04-0 16 534 B

Elektrische Bahnen, 80.Jg., 1982, H.4, S.119-125;
Eisenbahntechnische Rundschau, Bd.35, H.9,
Sept. 1986, S.593-599;
Elektrische Bahnen, 86.Jg., 1988, H.9, S.268-289;
Fischer, H., Werkstoffe der Elektrotechnik, 3. Aufl.,
Hanser Verlag München Wien, 1987, S. 113-121,172;
DIN 50145/46;

㉚ Oberleitungsfahrdraht einer elektrischen Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke und Verfahren zu dessen Herstellung

㉛ Der Oberleitungsfahrdraht für elektrische Hochgeschwindigkeitsbahnen weist eine Zugfestigkeit (R_m) von mindestens 500 MPa und eine elektrische Leitfähigkeit (κ) von mindestens 60% nach IACS auf. Er besteht aus einer $Cu_aCr_bX_c$ -Legierung mit $0,2 \leq b \leq 0,8$ und $0,01 \leq c \leq 0,4$, wobei $a + b + c \approx 100$ (jeweils in Gew.-%). Als X-Komponente soll mindestens eines der Elemente Al, Ni, Zn, In und Sn vorgesehen sein. Der Draht wird vorteilhaft durch Erschmelzen der Legierung, langsames Abkühlen, eventuelles Vorverformen, mindestens einmaliges Kaltverformen und mindestens einmaliges Wärmebehandeln zur Auslagerung hergestellt.

DE 195 39 174 C 1

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf einen Fahrdrabt der Oberleitung einer elektrischen Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke, welcher aus einer wenigstens 3-komponentigen, aushärtbaren CuCr-Legierung besteht und eine Zugfestigkeit (R_m) von mindestens 500 MPa und eine elektrische Leitfähigkeit (κ) von mindestens 60%, bezogen auf die von geglühtem reinem Kupfer gemäß International Annealed Copper Standard (IACS), aufweist. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Oberleitungsfahrdrabtes. Ein derartiger Oberleitungsfahrdrabt und ein entsprechendes Herstellungsverfahren gehen aus der EP 0 569 036 A hervor.

Auf Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken ist für eine sichere Energiezufuhr über ein Oberleitungssystem eine hohe mechanische Vorspannung des Fahrdrabtes eine unverzichtbare Voraussetzung. An den Fahrdrabtwerkstoff werden somit höchste Anforderungen bezüglich seiner mechanischen Zugfestigkeit R_m bei gleichzeitig hoher elektrischer Leitfähigkeit κ gestellt.

Gegenwärtig wird für den Fahrdrabt der Regeloberleitung Re250 der Deutschen Bahn AG mit Rillenprofil und 120 mm² Durchmesser eine CuAg-Legierung mit einem Ag-Anteil von 0,1 Gew.-% Ag-Anteil verwendet. Diese Legierung weist eine Zugfestigkeit R_m von etwa 350 MPa (N/mm²) auf bei einer Leitfähigkeit κ von etwa 95%, bezogen auf die von geglühtem reinem Cu gemäß IACS (International Annealed Copper Standard). Der Fahrdrabt ist für einen Regelbetrieb mit Fahrgeschwindigkeiten von höchstens 250 km/h ausgelegt. Er ist unter Berücksichtigung einer unvermeidbaren Abnutzung mit 125 MPa vorgespannt, d. h. mit etwa 36% seiner Zugfestigkeit κ bzw. einer Sicherheitsmarge gegen Bruch von etwa 2,8 (vgl. "Elektrische Bahnen", 80. Jg., 1982, H. 4, Seiten 119 bis 125 oder "Eisenbahntechnische Rundschau", Bd. 35, H. 9, Sept. 1986, Seiten 593 bis 599). Diese Vorspannung wurde für eine Hochgeschwindigkeitsfahrt mit über 400 km/h kurzfristig auf 175 MPa erhöht ("Elektrische Bahnen", 86. Jg., 1988, H. 9, Seiten 268 bis 289).

Zur Auslegung der Oberleitung für einen Regelbetrieb mit Hochgeschwindigkeiten von über 300 km/h wird eine Fahrdrabtvorspannung von bis zu 200 MPa gefordert. Dies bedingt unter Zugrundelegung der vorgenannten Sicherheitsmarge eine Fahrdrabtlegierung mit einer Mindestzugfestigkeit κ von etwa 500 MPa. Die Zugfestigkeit wird dabei durch Zugversuche nach DIN 50 145/46 bestimmt (vgl. das Buch "Werkstoffe in der Elektrotechnik" von H. Fischer, 3. Auflage, G. Hanser Verlag München Wien, 1987, Seiten 113 bis 121). Hierbei besteht jedoch das Problem, daß mit einer Zulegierung von Zusatzkomponenten zu der Cu-Legierung zum Zweck der Erhöhung der Zugfestigkeit durch entsprechende Ausscheidungen vielfach die elektrische Leitfähigkeit der Legierung zu stark herabgesetzt wird.

Eine Mindestzugfestigkeit in der genannten Größenordnung kann z. B. mit aus der genannten EP-A zu entnehmenden Cu-Legierungen erreicht werden. Gemäß einem speziellen Ausführungsbeispiel setzt sich eine dieser Legierungen aus den Komponenten Cr (0,1 bis 1%), Zr (0,01 bis 0,3%), Mg (0,001 bis 0,05%), O (maximal 10 ppm) und Cu (Rest) unter Einschluß unvermeidbarer Verunreinigungen zusammen. Die gewählte Zusammensetzung der Legierung bedingt dabei, daß ein aus den erschmolzenen Komponenten gewonnener Gießstrang nach einem Warmwalzen zu einem Ausgangsdrabt entweder durch Eintauchen in ein Wasser- oder Ölbad sehr rasch abgekühlt werden muß oder nach einer langsameren Luftabkühlung anschließend einer zusätzlichen Wärmebehandlung (Lösungsglühung) mit Raschabkühlung unterzogen werden muß. Der so gewonnene Vorkörper wird dann mehreren Kaltverformungen unterzogen, die von Ausscheidungsglühungen unterbrochen sind. Wegen der generell notwendigen raschen Abkühlung des Vorprodukts von der Lösungstemperatur (860–1000°C) ist das bekannte Verfahren verhältnismäßig aufwendig und deshalb für eine kommerzielle Drahtfertigung wenig geeignet.

Aus der US-PS 4,755,235 ist ferner ein elektrischer Draht aus einer ausscheidungsgehärteten Cu-Legierung mit Cr (0,05 bis 1,5 Gew.-%), Zr (0,05 bis 0,5 Gew.-%) und Mg (0,005 bis 0,1 Gew.-%) zu entnehmen. Auch hier soll eine Legierungsschmelze rasch abgekühlt werden (innerhalb 1 bis 2 Minuten von etwa 1200°C auf Raumtemperatur).

Aus der JP 59/089743 A bzw. JP 04/016534 B geht eine Cu-Legierung hervor, die auch für Oberleitungsdrähte von Bahnen geeignet sein soll. Die Legierung enthält neben Cu als Hauptkomponente die weiteren Komponenten Cr (zu 0,03–0,2%), Sn (zu 0,05–1%) und P (zu < 0,2%). Um eine angestrebte hohe elektrische Leitfähigkeit und gute Lötbarkeit des Materials zu gewährleisten, soll der Cr-Anteil auf 0,2% beschränkt sein. Jedoch ist dann die Zugfestigkeit dieser Legierung für einen Einsatz bei Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken nicht ausreichend.

Auch die DE 36 34 495 C offenbart eine Sn-haltige Cu-Legierung, die jedoch für elektronische Elemente, die Halbleiter enthalten, geeignet sein soll. Die mindestens 5-komponentige Legierung weist neben Cu als Hauptkomponente Cr (zu 0,01 bis 1 Gew.-%), Sn (zu 0,01 bis 8 Gew.-%), mindestens eines der Elemente Zn, Mn und Mg (zu 0,001 bis 5 Gew.-%) sowie noch mindestens ein weiteres Element wie z. B. Zr (zu maximal 0,2 Gew.-%) auf. Die bekannte Cu-Legierung soll dabei ein feinkörniges Gefüge und einen Anteil bis zu 103/mm² an Ausscheidungen oder Einschlüssen mit einer Größe von mindestens 5 µm aufweisen. Eine Problematik bezüglich der für Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken zu fordernden Zugfestigkeit ist nicht angesprochen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen Oberleitungsfahrdrabt mit den eingangs genannten Merkmalen anzugeben, der einerseits die genannten Mindestanforderungen bezüglich der mechanischen Zugfestigkeit R_m und der elektrischen Leitfähigkeit κ erfüllt, so daß er für elektrische Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken einsetzbar ist, und der andererseits eine gegenüber den bekannten Verfahren zur Herstellung entsprechender Drähte vereinfachte Herstellung ermöglicht.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß eine wenigstens 3-komponentige, aushärtbare Cu_aCr_bX_c-Legierung vorgesehen ist, wobei X ein Element aus der Gruppe der Elemente Al, Ni, Zn, In und Sn ist und für die Komponenten gelten soll (jeweils in Gew.-%):

0,2 ≤ b ≤ 0,8 für X = Al, Ni, Zn oder In;

0,2 ≤ b ≤ 0,8 für X = Sn;

$0,01 \leq c \leq 0,4$;

mit

$a + b + c \approx 100$

unter Einschuß unvermeidbarer Verunreinigungselemente.

Die Erfindung geht dabei von der Erkenntnis aus, daß mit der Wahl der Zulegierung der besonderen X-Komponente zu einer CuCr-Legierung vorteilhaft auf eine besondere Behandlung des Draht-Vorproduktes in Form einer raschen Abkühlung von der Schmelz- bzw. Lösungstemperatur verzichtet werden kann. Ein aus der erfindungsgemäßen Legierung erschmolzenes, dann in üblicher Weise normal, z. B. von 1200°C auf Raumtemperatur in 5 bis 10 min, abgekühltes und gegebenenfalls noch beispielsweise durch Warmwalzen vorverformtes Ausgangsprodukt bzw. Drahtvorprodukt braucht also nur noch kaltverformt und ausgelagert zu werden, um einen Draht mit den gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Es wurde erkannt, daß die für die X-Komponente zu wählenden Materialien vorteilhaft die Streckgrenze der Cu-Legierung erhöhen und die Umformbarkeit des Drahtvorproduktes verbessern. Diese Eigenschaften sind insbesondere von Bedeutung, wenn bei der Herstellung des Drahtes ein Kaltverformen in mindestens einem Schritt, insbesondere in nur 2 bis 3 Schritten, vorgesehen werden soll.

Besonders vorteilhaft wird als X-Komponente Al oder In gewählt. Die entsprechende Cu-Legierung zeichnet sich durch verhältnismäßig hohe Zugfestigkeitswerte R_m und verhältnismäßig hohe Werte der 0,01%-Dehnungsgrenze (= technische Elastizitätsgrenze) aus.

Eine weitere Verbesserung dieser Eigenschaften ist mit einer Zulegierung von Zr mit einem Anteil zwischen 0,02 und 0,4 Gew.-% zu erreichen.

Außerdem ist es vorteilhaft, wenn der erfindungsgemäße Draht eine Si-freie Cu-Legierung aufweist. Denn durch die Vermeidung eines Si-Anteils läßt sich so eine unerwünschte Verminderung der elektrischen Leitfähigkeit κ ausschließen (vgl. z. B. das genannte Buch "Werkstoffe in der Elektrotechnik", Seite 172).

Das erfindungsgemäße Herstellungsverfahren ist dadurch gekennzeichnet, daß zunächst ein Drahtvorprodukt erstellt wird, wobei die Cu-Legierung erschmolzen und anschließend gegenüber einer Raschabkühlung vergleichsweise langsamer abgekühlt wird, darauf das Drahtvorprodukt mittels mindestens einer Kaltverformung in ein Drahtzwischenprodukt überführt wird, dann das Drahtzwischenprodukt mindestens einer Auslagerungswärmebehandlung unterzogen wird und gegebenenfalls die Schritte der Kaltverformung und/oder der Auslagerungsbehandlung mindestens noch einmal wiederholt werden, wobei mit der letzten Kaltverformung die Endform des Drahtes erzeugt wird. Dabei kann das Drahtvorprodukt unmittelbar aus der Schmelze der Cu-Legierung gegossen werden. Es ist aber auch möglich, ein aus der langsam erstarrten Schmelze ausgebildetes Ausgangsprodukt mittels mindestens einer Vorverformung in das Drahtvorprodukt zu überführen. Da die für eine Raschabkühlung charakteristischen Abkühlraten bei etwa 100°C/s und höher liegen, soll bei dem erfindungsgemäßen Verfahren die Schmelze mit vergleichsweise kleinerer Abkühlrate, insbesondere mit höchstens 20°C/s in dem wichtigen Temperaturbereich von der Schmelztemperatur auf etwa 700°C, abgekühlt werden. Unterhalb von 700°C kann die Abkühlrate noch deutlich geringer sein und beispielsweise bei 5°C/s liegen. Solche Abkühlraten lassen sich ohne größeren Aufwand realisieren, so daß das erfindungsgemäße Verfahren vorteilhaft entsprechend einfach durchzuführen ist. Die Auslagerungswärmebehandlung wird in an sich bekannter Weise bei erhöhter Temperatur und über einen solchen Zeitraum durchgeführt, daß sich die für eine Härtung des Materials erforderlichen Ausscheidungen an den mit der Kaltverformung erzeugten Versetzungsstrukturen ausbilden.

Vorteilhafte Weiterbildungen des Oberleitungsfahrdrahtes und des Verfahrens zu seiner Herstellung gehen aus den jeweils abhängigen Ansprüchen hervor.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen noch weiter erläutert.

Zur Herstellung eines Oberleitungsfahrdrahtes aus einer Cu-Legierung mit der erfindungsgemäßen Zusammensetzung wird zunächst das Material aus den einzelnen Komponenten vorzugsweise in einer Schutzgasatmosphäre wie z. B. unter Ar erschmolzen. Der Sauerstoffgehalt in der Schmelze sollte nämlich möglichst niedrig sein und vorzugsweise unter 100 ppm liegen. Um eine gute Homogenität der Schmelze zu gewährleisten, muß über den Schmelzpunkt von Cu (1084°C), insbesondere auf mindestens 1200°C erhitzt werden. Gegebenenfalls kommen noch höhere Temperaturen in Frage. Deswegen wird vorteilhaft ein Induktionsschmelzen vorgesehen. Die Schmelze wird dann mit einer Abkühlgeschwindigkeit bzw. -rate (in °C/min) abgekühlt, die in dem für die Ausbildung des ausscheidungsgehärteten Materials wichtigen Temperaturbereich zwischen der Schmelztemperatur und etwa 700°C deutlich unterhalb der für eine rasche Abkühlung charakteristischen Abkühlraten von mindestens etwa 100°C/s liegt. So kommen insbesondere Abkühlraten von höchstens 20°C/s in dem genannten Temperaturbereich in Frage. Solche Abkühlraten lassen sich beispielsweise durch ein einfaches Abgießen in eine wassergekühlte Kokille unter Luft oder in einer Schutzgasatmosphäre realisieren. Auf ein Abschrecken in einem Wasser- oder Ölbad kann also vorteilhaft verzichtet werden. Das direkte Abgießen der Schmelze zu einem Vordraht mit z. B. 20 bis 30 mm Durchmesser mittels Abziehens der Schmelze durch eine wassergekühlte, horizontal gelagerte Kokille ist hier besonders geeignet.

Die gegebenenfalls zu Blöcken oder Barren abgegossene Schmelzmasse kann dann noch umgeschmolzen werden, um daraus ein hinsichtlich der Drahtform geeigneteres Drahtvorprodukt zu schaffen. Darüber hinaus läßt sich die abgekühlte Schmelzmasse durch ein Warmwalzen zu einem Drahtvorprodukt als ein Vordraht verarbeiten. Das Warmwalzen kann sich auch in einem kontinuierlichen Schritt, einem sogenannten Gießwalzen, unmittelbar an das Erschmelzen der Cu-Legierung anschließen. Ferner ist auch ein Umschmelzen der abgekühlten Schmelzmasse zu einem Barren möglich, der z. B. durch Strangpressen zu einem Vordraht verarbeitet wird. Aus einem entsprechenden Barren können auch stiftartige Körper herausgearbeitet werden, die dann z. B. durch Rundhämmern zu einem Vordraht verformt werden. Der Vordrahtquerschnitt sollte dabei so eingestellt werden, daß bei der sich anschließenden mindestens einen Kaltverformung eine Querschnittsreduktion von 50 bis 99%,

vorzugsweise von 60 bis 95%, erfolgt, um so den gewünschten Endquerschnitt des Oberleitungsfahrdrahtes zu erhalten.

Das vielfach auch als Vordraht bezeichnete Drahtvorprodukt wird anschließend einer ersten Kaltverformung unterzogen. Eine solche Kaltverformung kann z. B. durch Pressen oder Walzen oder Hämmern, insbesondere durch Ziehen, vorgenommen werden. Der Verformungsgrad liegt dabei im allgemeinen zwischen 20 und 80%, vorzugsweise zwischen 40 und 70%. Beispielsweise werden drei Ziehschritte mit einer Querschnittsreduktion von 38% bis 34% (1. Schritt) bzw. von 34% bis 30% (2. Schritt) bzw. von 26% bis 24% (3. Schritt) gewählt. Mit dieser Kaltverformung werden in dem so zu erhaltenden Drahtzwischenprodukt in bekannter Weise Versetzungsstrukturen erzeugt, die Voraussetzung für eine hinreichende Härtung des Materials sind.

Dem ersten Kaltverformungsschritt schließt sich dann eine erste Auslagerungswärmebehandlung des Drahtzwischenproduktes an, die vorteilhaft bei einer Temperatur zwischen 350°C und 600°C, vorzugsweise zwischen 450°C und 500°C, durchgeführt wird. Mit dieser Wärmebehandlung wird eine Härtung des Materials aufgrund von Ausscheidungen an den mit der Kaltverformung erzeugten Versetzungsstrukturen erreicht. Die Dauer dieser Wärmebehandlung liegt im allgemeinen zwischen 10 Minuten und 10 Stunden. Bei großen Chargen sind dabei erhebliche Aufheiz- und Abkühlzeiten zu berücksichtigen.

Die Verarbeitungsschritte der Kaltverformung und/oder Härtung durch Wärmebehandlung werden zweckmäßigerweise wiederholt, wobei vorteilhaft mit einer Kaltverformung abgeschlossen wird, um das gewünschte Endprodukt des Oberleitungsfahrdrahtes im hartgezogenen Zustand zu erhalten. Wenn diese letzte Kaltverformung in nur einem Schritt vorgenommen werden soll, dann sollte die hier zu wählende Querschnittsreduktion nicht über 20% bis 22% betragen. Selbstverständlich kann sich aber jede Kaltverformung, also insbesondere auch die letzte Kaltverformung, aus mehreren Kaltverformungsschritten zusammensetzen.

Hinsichtlich einer möglichst einfachen Herstellung des Oberleitungsfahrdrahtes kann man gegebenenfalls auch eine nur einstufige Kaltverformung vorsehen. Der Verformungsgrad liegt hier natürlich höher.

Für den so herzustellenden Oberleitungsfahrdraht wird erfindungsgemäß eine mindestens 3-komponentige Cu-Legierung der Zusammensetzung $\text{Cu}_a\text{Cr}_b\text{X}_c$ vorgesehen. Um eine Mindestfestigkeit R_m von 500 MPa und eine elektrische Leitfähigkeit κ von mindestens 60% TACS gewährleisten zu können, sollen für die einzelnen Komponenten folgende Anteile (jeweils in Gew.-%) gewählt werden:

$$0,2 \leq b \leq 0,8, \text{ wobei für } X = \text{Sn} \text{ gelten soll: } 0,2 < b \leq 0,8,$$

$$0,01 \leq c \leq 0,4$$

und

$$a + b + c + d + e = 100 - \delta,$$

wobei δ durch den Einschluß unvermeidbarer Verunreinigungselemente in der Legierung bestimmt ist. Dieser Anteil δ an Verunreinigungselementen liegt im allgemeinen unter 100 ppm pro Verunreinigungselement.

Die Cu-Legierung des erfindungsgemäßen Oberleitungsfahrdrahtes soll als X-Komponente zumindest eines der Elemente aus der Gruppe Al, Ni, Zn, In und Sn mit einem Anteil zwischen 0,01 und 0,4 Gew.-%, vorzugsweise zwischen 0,02 und 0,2 Gew.-% enthalten. Diese Elemente, die im wesentlichen auch nach der Wärmebehandlung im Cu gelöst bleiben, sind insbesondere unter den folgenden zwei Gesichtspunkten von Vorteil:

- 1) Das Material besitzt gegenüber der nur 2-komponentigen CuCr-Legierung eine verbesserte Kaltumformbarkeit.
- 2) Der Kaltverfestigungsgrad während der abschließenden Kaltumformung ist vergleichsweise höher, so daß eine gegenüber der 2-komponentigen Legierung erhöhte Elastizitätsgrenze erreicht wird. Diese Vorteile kommen insbesondere bei einer nur einstufigen Kaltverformung zum Tragen.

Darüber hinaus kann vorteilhaft zu der $\text{Cu}_a\text{Cr}_b\text{X}_c$ -Legierung als weitere Komponente Zr hinzulegiert sein, und zwar mit einem Anteil an der Gesamtlegierung zwischen 0,02 und 0,4 Gew.-%, vorzugsweise von höchstens 0,2 Gew.-%. Mit dieser Komponente ist eine weitere Verbesserung der Kaltumformbarkeit und Erhöhung der Elastizitätsgrenze zu erreichen.

Im Hinblick auf die geforderten Materialeigenschaften und die verhältnismäßig einfache Verarbeitungsmöglichkeit zu einem Oberleitungsfahrdraht ist es ferner als besonders vorteilhaft anzusehen, wenn der Anteil c der X-Komponente mindestens 0,05 Gew.-% beträgt. Offenbar hält dann der X-Zusatz auch die Komponente Cr und, falls als weitere Komponente Zr vorgesehen sein sollte, auch diese Komponente während der verhältnismäßig langsamen Abkühlungsphase der Schmelze in Lösung. Zugleich wird vorteilhaft ein Anteil b der Cr-Komponente gewählt, der mindestens 0,3 Gew.-% beträgt und vorteilhaft unter 0,6 Gew.-% liegt. Im Falle des Vorhandenseins der Zusatzkomponente Zr sollte der Anteil c dieser Komponente mindestens 0,15 Gew.-% betragen.

Die vorgenannten Anteile der einzelnen Komponenten gewährleisten eine gute Aushärtbarkeit und somit Zugfestigkeit über den genannten Mindestwert von 500 MPa hinaus der Legierung bei einer hinreichenden Leitfähigkeit und einer genügenden Bruchdehnung des Materials.

Die nachfolgende Tabelle I zeigt die Zugfestigkeit R_m , die Mikrohärtigkeit HV, die Leitfähigkeit κ und die Bruchdehnung ϵ_B für einige Drähte aus erfindungsgemäßen Cu-Legierungen im Vergleich zu der bekannten CuAg0,1-Legierung für verschiedene Verarbeitungszustände. Zur mechanischen Charakterisierung wurden standardmäßig die Zugfestigkeit R_m , die sogenannte 0,01%-Dehngrenze (= technische Elastizitätsgrenze) $R_{p0,01}$ und die Bruchdehnung $\epsilon_B \approx A_{100}$ bei Raumtemperatur bestimmt. Dies geschah in Zerreißversuchen an 100 mm langen Drahtstücken mit meist 1 mm Φ bei einer Dehngeschwindigkeit von 1 mm/min entsprechend $1,7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. An Querschliffen senkrecht zur Drahtlängsrichtung wurde die Mikrohärtigkeit HV₅₀ bestimmt. Die elektrische Leitfähigkeit κ wurde mit 0,2 bis 1 A Wechselstrom in Lock-in-Technik bei 370 Hz mit Hilfe einer Vierpunktme-

thode gemessen. Die ermittelten Leitfähigkeitswerte gelten für eine Temperatur von 20°C. Die angegebenen Eigenschaften sind bei entsprechenden Oberleitungsfahrdrähten dieselben.

Tabelle

Legierung (in Gew.-%)	R _m (MPa)	R _{p0,01} (MPa)	HV (kp/mm ²)	K (%IACS)	EB (%)	Verarbeitungszustand bzw. -folge
CuCr0.5In0.1	540	320	190	70,9	2,1	Prozeß 1 (60 %), Prozeß 2 (450°C/30 min), Prozeß 1 (89 %), Prozeß 2 (480°C/30 min), Prozeß 1 (19 %)
CuCr0.5In0.36Zr0.1	562	344	201	67,7	1,9	Prozeß 1 (68 %), Prozeß 2 (480°C/30 min), Prozeß 1 (22 %)
CuCr0.5Al0.15	520	378	188	65,0	2,0	Prozeß 1 (68 %), Prozeß 2 (480°C/30 min), Prozeß 1 (22 %)
CuCr0.5Al0.005Zr0.18	556	326	204	64,3	2,1	Prozeß 1 (68 %), Prozeß 2 (480°C/30 min), Prozeß 1 (22 %)
CuCr0.5 Sn0.37Zr0.18	571	365	190	61,8	1,8	Prozeß 1 (68 %), Prozeß 2 (480°C/30 min), Prozeß 1 (22 %)
CuCr0.5Zn0.21Zr0.18	511	301	195	60,4	2,0	Prozeß 1 (68 %), Prozeß 2 (480°C/30 min), Prozeß 1 (22 %)
CuCr0.5Ni0.18Zr0.15	558	344	193	66,6	1,7	Prozeß 1 (68 %), Prozeß 2 (480°C/30 min), Prozeß 1 (22 %)
CuAg0.1	355	n.g.	120	96,0	1,5	Prozeß 1 (68 %)
CuAg0.1	336	n.g.	112	96,4	3,6	Prozeß 1 (31 %)

Dabei bedeuten in der Tabelle jeweils Prozeß 1 eine Kaltverformung und Prozeß 2 eine Warmauslagerung;
n.g. = nicht gemessen.

5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60

Zur Herstellung der in der Tabelle I aufgeführten Legierungen wurde von hochreinen Elementen (99,99%) der Komponenten ausgegangen. Mit den Elementen wurden in einer Ar-Schutzgasatmosphäre zylindrische Reguli (ca. 60 g) in einem MgO-Tiegel induktiv erschmolzen und anschließend in einem Lichtbogenofen zu Barren (Länge ca. 10 bis 15 cm) umgeschmolzen. Aus den Barren wurden funkenersiv und durch Drehen Stifte mit

kreisförmigem Querschnitt (typisch 3 mm Durchmesser \varnothing) herausgeschnitten, wobei der beim Schmelzen gebildete Schlackesack entfernt wurde. Die Stifte wurden zunächst auf ca. 2 mm \varnothing rundgehämmert und anschließend auf ca. 1,5 mm \varnothing gezogen. Die Kaltumformung wurde mit kleinen Stichabnahmen von 0,1 bis 0,05 mm durchgeführt. Eine relative Querschnittsreduktion beim Kaltziehen von ca. 75%, entsprechend einer Längung von $l/l_0 = 44$, d. h. einem Umformungsgrad $\varphi = \ln(l/l_0)$ von 1,39, konnte bei allen untersuchten Legierungen aufgrund eines hohen Kaltverformungsvermögens ohne Materialfehler erzielt werden. Die Wärmebehandlungen wurden in einem Quarzrohr unter Ar-Atmosphäre durchgeführt. Nach Auslagerungsglühungen (450 bis 500°C) wurde das Material im Quarzrohr außerhalb des Ofens relativ langsam abgekühlt.

Abweichend von den in der Tabelle I aufgeführten Cu-Legierungen sind insbesondere auch mit den folgenden, aus Tabelle II entnehmbaren erfindungsgemäßen Legierungen die genannten Zugfestigkeits- und Leitfähigkeitsbedingungen zu erfüllen, wobei der nicht-spezifizierte Cu-Anteil den Restanteil auf 100% (unter Einschluß unvermeidbarer Verunreinigungselemente) ausmacht. Die Angaben in Tabelle II sind jeweils in Gew.-%:

Tabelle II

Cu	Cr 0,5	Al 0,35	
Cu	Cr 0,4	Ni 0,1	
Cu	Cr 0,5	Zn 0,2	
Cu	Cr 0,5	In 0,1	
Cu	Cr 0,5	Sn 0,2	
Cu	Cr 0,6	Al 0,2	Zr 0,1
Cu	Cr 0,4	Ni 0,1	Zr 0,2
Cu	Cr 0,5	Zn 0,1	Zr 0,1
Cu	Cr 0,4	In 0,15	Zr 0,25
Cu	Cr 0,6	Sn 0,25	Zr 0,2

Die erfindungsgemäße 3-komponentige Legierung stellt selbstverständlich nur eine Basislegierung für einen Oberleitungsfahrdraht für elektrische Hochgeschwindigkeitsbahnen dar. Zu dieser Legierung kann gegebenenfalls mindestens ein weiteres Element zu einem verhältnismäßig geringen Anteil von unter 0,1 Gew.-% hinzulegiert sein. Solche Zusatzelemente werden insbesondere aus den für die X-Komponente vorgesehenen Elementen ausgewählt. Ein entsprechendes Beispiel wäre eine CuCrO, SnIO, 15A10,05-Legierung.

Patentansprüche

1. Fahrdraht der Oberleitung einer elektrischen Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke, welcher aus einer wenigstens 3-komponentigen, aushärtbaren $\text{Cu}_a\text{Cr}_b\text{X}_c$ -Legierung besteht und eine Zugfestigkeit (R_m) von mindestens 500 MPa und eine elektrische Leitfähigkeit (κ), bezogen auf die von geglühtem reinem Cu (International Annealed Copper Standard), von mindestens 60% aufweist, wobei X ein Element aus der Gruppe der Elemente Al, Ni, Zn, In und Sn ist und für die Komponenten (jeweils in Gew.-%) gilt:

$0,2 \leq b \leq 0,8$ für $X = \text{Al, Ni, Zn, In}$;

$0,2 \leq b \leq 0,8$ für $X = \text{Sn}$;

$0,01 \leq c \leq 0,4$;

mit $a + b + c \approx 100$ unter Einschluß unvermeidbarer Verunreinigungselemente.

2. Fahrdraht nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das für die X_c -Komponente gilt:

$0,02 \text{ Gew.-%} \leq c \leq 0,2 \text{ Gew.-%}$, vorzugsweise $c \geq 0,05 \text{ Gew.-%}$.

3. Fahrdraht nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß für die Crb -Komponente gilt:

$0,3 \text{ Gew.-%} \leq b \leq 0,6 \text{ Gew.-%}$.

4. Fahrdraht nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Cu-Legierung mindestens ein weiteres Element aus der Gruppe der X-Elemente zu einem Anteil unter 0,1 Gew.-% hinzulegiert ist.

5. Fahrdraht nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Cu-Legierung als weitere Komponente Zr zu einem Anteil zwischen 0,02 und 0,4 Gew.-%, vorzugsweise von höchstens 0,2 Gew.-% enthält.

6. Fahrdraht nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Cu-Legierung praktisch frei von Si ist.

7. Fahrdraht nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Cu-Legierung als weitere Komponente Si mit einem Anteil von höchstens 0,1 Gew.-% enthält.

8. Verfahren zur Herstellung des Oberleitungsfahrdrahtes nach einem der Ansprüche 1 bis 7, gekennzeichnet, durch folgende Schritte:

a) Es wird zunächst ein Fahrdrahtvorprodukt erstellt, wobei die Cu-Legierung erschmolzen und anschließend gegenüber einer Raschabkühlung vergleichsweise langsamer abgekühlt wird,

- b) darauf wird das Fahrdrahtvorprodukt mittels mindestens einer Kaltverformung in ein Fahrdrahtzwischenprodukt überführt,
 c) dann wird das Fahrdrahtzwischenprodukt mindestens einer Auslagerungswärmebehandlung unterzogen,
 d) gegebenenfalls werden die Schritte b) und/oder c) mindestens noch einmal wiederholt, 5
 wobei mit der letzten Kaltverformung die Endform des Fahrdrahtes erzeugt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Fahrdrahtvorprodukt dadurch ausgebildet wird, daß zunächst ein Ausgangsprodukt aus den Elementen der Cu-Legierung mittels Erschmelzens und anschließender Abkühlung erstellt wird und dann das Ausgangsprodukt mittels mindestens einer Vorverformung in das Fahrdrahtvorprodukt überführt wird. 10
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die mindestens eine Vorverformung bei erhöhter Temperatur vorgenommen wird.
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die mindestens eine Vorverformung mittels Pressens und/oder Walzens und/oder Hämmerns vorgenommen wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß mittels der mindestens einen Vorverformung des Ausgangsproduktes ein Fahrdrahtvorprodukt gebildet wird, dessen Querschnitt eine Querschnittsreduktion durch das mindestens eine nachfolgende Kaltverformen von 50 bis 99%, vorzugsweise von 60 bis 95%, erforderlich macht, um den gewünschten Endquerschnitt des Fahrdrahtes zu erhalten. 15
13. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Fahrdrahtvorprodukt aus der Schmelze der Cu-Legierung gegossen wird. 20
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß eine Abkühlung der Schmelze in Schritt a) im Temperaturbereich zwischen der Schmelztemperatur und 700°C mit einer Abkühlrate von unter 100°C/s, vorzugsweise von höchstens 20°C/s erfolgt.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß das Erschmelzen bei Schritt a) bei einer Temperatur von mindestens 1200°C vorgenommen wird. 25
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens zwei Kaltverformungen vorgesehen werden, wobei mit der letzten Kaltverformung eine vergleichsweise geringere Querschnittsreduktion erfolgt.
17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß mit der ersten Kaltverformung eine Querschnittsreduktion zwischen 60 und 80% und mit der letzten Kaltverformung eine Querschnittsreduktion zwischen 10 und 30% erfolgt. 30
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß mit der letzten Kaltverformung das Endprodukt des Fahrdrahtes erhalten wird.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß mit einer einzigen Kaltverformung des Fahrdrahtvorproduktes die Endform des Fahrdrahtes erzeugt wird. 35
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens eine Kaltverformung mehrere Verformungsschritte umfaßt.
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die letzte Kaltverformung mehrere Verformungsschritte umfaßt.
22. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß die mindestens eine Kaltverformung mittels Pressens und/oder Walzens und/oder Hämmerns und/oder Ziehens vorgenommen wird. 40
23. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß die mindestens eine Auslagerungswärmebehandlung bei einer Temperatur zwischen 350°C und 600°C vorgenommen wird. 45

50

55

60

65